

## ÍNDICE

|                           |    |
|---------------------------|----|
| <i>Introducción</i> ..... | 15 |
|---------------------------|----|

### UNIDAD DIDÁCTICA I

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Capítulo 1. MECANISMOS BÁSICOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR</i> ..... | 19 |
|---------------------------------------------------------------------|----|

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 1. Introducción .....                                   | 21 |
| 2. Consideraciones generales .....                      | 22 |
| 3. Conducción. Ley de Fourier .....                     | 24 |
| 4. Ecuación diferencial del campo de temperatura .....  | 25 |
| 5. Flujo laminar y flujo turbulento. Viscosidad .....   | 27 |
| 6. Capas límite dinámica y térmica .....                | 30 |
| 7. Convección. Ley de enfriamiento de Newton .....      | 33 |
| 8. Radiación térmica .....                              | 35 |
| 9. Propiedades termofísicas de los materiales .....     | 37 |
| 9.1. Densidad .....                                     | 38 |
| 9.2. Conductividad térmica .....                        | 39 |
| 9.3. Coeficiente de dilatación térmica .....            | 42 |
| 9.4. Calor específico .....                             | 43 |
| 9.5. Viscosidad .....                                   | 44 |
| 9.6. Difusividad térmica .....                          | 44 |
| 10. Ejercicios de autocomprobación .....                | 45 |
| 11. Solución a los ejercicios de autocomprobación ..... | 46 |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| <i>Capítulo 2. CONDUCCIÓN EN RÉGIMEN PERMANENTE</i> ..... | 51 |
|-----------------------------------------------------------|----|

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introducción .....                                                | 53 |
| 2. Consideraciones generales .....                                   | 53 |
| 3. Pared plana simple con temperaturas superficiales dadas .....     | 56 |
| 3.1. Resistencia y conductancia térmicas .....                       | 57 |
| 4. Pared plana compuesta con temperaturas superficiales dadas .....  | 58 |
| 5. Pared plana compuesta bañada por fluidos a temperaturas dadas ... | 61 |
| 5.1. Coeficiente global de transmisión .....                         | 62 |
| 6. Pared cilíndrica simple .....                                     | 63 |

|                                                                                           |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7. Pared cilíndrica compuesta .....                                                       | 64         |
| 7.1. Radio crítico .....                                                                  | 67         |
| 8. Pared esférica .....                                                                   | 71         |
| 9. Ejercicios de autocomprobación .....                                                   | 73         |
| 10. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....                                   | 75         |
| <b>Capítulo 3. SUPERFICIES ADICIONALES .....</b>                                          | <b>79</b>  |
| 1. Introducción .....                                                                     | 81         |
| 2. Ecuación general de las superficies adicionales .....                                  | 83         |
| 3. Aletas longitudinales de espesor uniforme y agujas de sección<br>recta constante ..... | 85         |
| 3.1. Campo de temperatura .....                                                           | 85         |
| 3.2. Flujo de calor .....                                                                 | 89         |
| 3.3. Aletas longitudinales muy largas .....                                               | 90         |
| 3.4. Efectividad de la aleta longitudinal de espesor uniforme ....                        | 91         |
| 3.5. Campo de aplicación .....                                                            | 92         |
| 3.6. Dimensiones óptimas .....                                                            | 94         |
| 4. Aleta anular de espesor uniforme .....                                                 | 96         |
| 5. Coeficiente global de transmisión en tubos aleteados .....                             | 101        |
| 6. Ejercicios de autocomprobación .....                                                   | 105        |
| 7. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....                                    | 107        |
| <b>Capítulo 4. CONDUCCIÓN EN RÉGIMEN VARIABLE .....</b>                                   | <b>111</b> |
| 1. Introducción .....                                                                     | 113        |
| 2. Cambio brusco en la temperatura del fluido que baña una placa ..                       | 114        |
| 3. Cambio brusco en la temperatura del fluido que baña un cilindro ..                     | 121        |
| 4. Cambio brusco en la temperatura del fluido que baña una esfera ..                      | 124        |
| 5. Cambio brusco en la temperatura superficial de una placa plana ...                     | 128        |
| 6. Cambio brusco en la temperatura superficial de un sólido casi<br>ilimitado .....       | 129        |
| 7. Cambio brusco en la temperatura del fluido que baña un sólido<br>casi-ilimitado .....  | 132        |
| 8. Ejercicios de autocomprobación .....                                                   | 134        |
| 9. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....                                    | 136        |

## UNIDAD DIDÁCTICA II

|                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Capítulo 5. CONVECCIÓN FORZADA EN RÉGIMEN LAMINAR .....</b> | <b>141</b> |
| 1. Introducción .....                                          | 143        |

|                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 2. Ecuaciones de la capa límite .....                                 | 143        |
| 3. Flujo laminar a lo largo de placas planas .....                    | 149        |
| 3.1. Campo de velocidad .....                                         | 149        |
| 3.2. Coeficiente de arrastre .....                                    | 152        |
| 3.3. Campo de temperatura .....                                       | 153        |
| 3.4. Caso de rozamiento despreciable .....                            | 156        |
| 4. Flujo viscoso en conductos circulares .....                        | 158        |
| 5. Flujo totalmente desarrollado en conductos circulares .....        | 159        |
| 5.1. Perfil de velocidad .....                                        | 160        |
| 5.2. Perfil de esfuerzo cortante .....                                | 161        |
| 5.3. Coeficiente de arrastre .....                                    | 162        |
| 5.4. Perfil de temperatura y flujo de calor .....                     | 162        |
| 6. Ejercicios de autocomprobación .....                               | 168        |
| 7. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....                | 169        |
| <b>Capítulo 6. CONVECCIÓN FORZADA EN FLUJO TURBULENTO .....</b>       | <b>173</b> |
| 1. Introducción .....                                                 | 175        |
| 2. Concepto de viscosidad turbulenta y de conductividad turbulenta .. | 175        |
| 3. Capa límite turbulenta .....                                       | 177        |
| 4. Correlaciones para placas planas en flujo turbulento .....         | 180        |
| 4.1. Analogía de Reynolds para flujo laminar .....                    | 180        |
| 4.2. Analogía de Prandtl para flujo turbulento .....                  | 182        |
| 4.3. Otras correlaciones para flujo turbulento .....                  | 186        |
| 5. Flujo externo transversal a un tubo .....                          | 187        |
| 6. Flujo externo transversal a haces de tubos .....                   | 189        |
| 7. Flujo turbulento interno .....                                     | 193        |
| 8. Analogías en flujo turbulento interno .....                        | 197        |
| 9. Correlaciones empíricas en flujo turbulento interno .....          | 199        |
| 10. Ejercicios de autocomprobación .....                              | 202        |
| 11. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....               | 203        |
| <b>Capítulo 7. CONVECCIÓN NATURAL .....</b>                           | <b>209</b> |
| 1. Introducción .....                                                 | 211        |
| 2. Convección libre alrededor de placas y cilindros verticales .....  | 213        |
| 3. Convección libre alrededor de cilindros horizontales .....         | 215        |
| 4. Convección libre alrededor de placas planas horizontales .....     | 216        |
| 5. Convección libre alrededor de cuerpos diversos .....               | 217        |
| 6. Ejercicios de autocomprobación .....                               | 218        |

|                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....                          | 219        |
| <b>Capítulo 8. TRANSMISIÓN DE CALOR EN LOS CAMBIOS DE ESTADO ...</b>            | <b>223</b> |
| 1. Introducción .....                                                           | 225        |
| 2. Condensación de un vapor puro .....                                          | 225        |
| 3. Condensación en película sobre superficies verticales .....                  | 227        |
| 4. Condensación en película sobre un cilindro horizontal .....                  | 234        |
| 5. Condensación en película sobre haces de tubos .....                          | 234        |
| 6. Condensación en el interior de tubos .....                                   | 235        |
| 7. Ebullición de líquidos puros .....                                           | 237        |
| 8. Ebullición en masa .....                                                     | 237        |
| 9. Ebullición superficial en líquidos estancados .....                          | 239        |
| 9.1. Convección libre sin formación de burbujas .....                           | 240        |
| 9.2. Ebullición nucleada .....                                                  | 241        |
| 9.3. Ebullición pelicular inestable .....                                       | 246        |
| 9.4. Ebullición pelicular estable .....                                         | 246        |
| 9.5. Crisis de ebullición: quemado .....                                        | 247        |
| 10. Transmisión del calor en la ebullición nucleada .....                       | 247        |
| 11. Transmisión del calor en la ebullición pelicular .....                      | 249        |
| 12. Ebullición local en líquidos subenfriados .....                             | 249        |
| 13. Ebullición en tubos con circulación forzada .....                           | 250        |
| 14. Correlaciones de interés en circulación forzada .....                       | 254        |
| 15. Ebullición en tubos con circulación natural .....                           | 255        |
| 16. Ejercicios de autocomprobación .....                                        | 255        |
| 17. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....                         | 257        |
| <b>Capítulo 9. INTERCAMBIADORES DE CALOR (I) .....</b>                          | <b>261</b> |
| 1. Introducción .....                                                           | 263        |
| 2. Clasificación .....                                                          | 263        |
| 2.1. Cambiadores de superficie .....                                            | 265        |
| 2.2. Cambiadores de placas .....                                                | 266        |
| 2.3. Ventajas e inconvenientes de la utilización de cambiadores de placas ..... | 269        |
| 2.4. Cambiadores multitubulares .....                                           | 270        |
| 2.5. Representación esquemática de los cambiadores multitubulares .....         | 271        |
| 2.6. Cambiadores de flujos cruzados .....                                       | 272        |
| 3. Distribución de temperaturas en el interior de intercambiadores ..           | 274        |

|                                                                                   |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 4. Coeficiente global de transmisión .....                                        | 282     |
| 5. Ensuciamiento .....                                                            | 283     |
| 6. Coeficiente global real de transmisión .....                                   | 285     |
| 7. Diferencia media de temperaturas .....                                         | 291     |
| 7.1. Caso de cambiadores de 1 paso por carcasa, 1 por tubos ....                  | 292     |
| 7.2. Cambiadores de calor de pasos múltiples .....                                | 296     |
| 8. Ejercicios de autocomprobación .....                                           | 307     |
| 9. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....                            | 308     |
| <br><b>Capítulo 10. INTERCAMBIADORES DE CALOR (II)</b> .....                      | <br>313 |
| 1. Introducción. Hipótesis para el cálculo térmico de intercambia-<br>dores ..... | 315     |
| 1.1. Fluidos sin cambio de estado .....                                           | 317     |
| 1.2. Fluidos con cambio de estado .....                                           | 323     |
| 2. Pérdida de carga en cambiadores .....                                          | 325     |
| 2.1. Caída de presión en el interior de los tubos .....                           | 326     |
| 2.2. Pérdida de carga en el exterior de los tubos .....                           | 327     |
| 3. Método del número de unidades de transmisión .....                             | 330     |
| 4. Utilización del método del N.T.U. ....                                         | 339     |
| 5. Ejercicios de autocomprobación .....                                           | 340     |
| 6. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....                            | 342     |
| <br><b>Capítulo 11. RADIACIÓN EN MEDIO NO ABSORBENTE</b> .....                    | <br>349 |
| 1. Introducción .....                                                             | 351     |
| 2. Transmisión de calor por radiación. Características especiales ...             | 351     |
| 3. Absorción, reflexión y transmisión .....                                       | 353     |
| 4. Leyes de la radiación .....                                                    | 356     |
| 4.1. Ley de Prevost .....                                                         | 356     |
| 4.2. Ley de Planck .....                                                          | 356     |
| 4.3. Ley del desplazamiento de Wien .....                                         | 358     |
| 4.4. Ley de Stefan-Boltzman .....                                                 | 359     |
| 4.5. Generalización de la ley de Stefan-Boltzman .....                            | 360     |
| 4.6. Ley de Kirchhoff .....                                                       | 361     |
| 4.7. Ley de Lambert .....                                                         | 362     |
| 5. Intercambio de radiación entre planos infinitos y paralelos .....              | 365     |
| 5.1. Caso de planos negros .....                                                  | 365     |
| 5.2. Caso de planos grises .....                                                  | 366     |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3. Pantallas planas de radiación .....                                   | 368 |
| 6. El factor de intercambio de radiación y sus propiedades .....           | 369 |
| 6.1. Cálculo del factor de intercambio en configuraciones<br>simples ..... | 373 |
| 6.2. Paredes rerradiantes. El factor f .....                               | 376 |
| 6.3. Superficies grises unidas por paredes rerradiantes .....              | 378 |
| 7. Ejercicios de autocomprobación .....                                    | 381 |
| 8. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....                     | 381 |

### UNIDAD DIDÁCTICA III

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Capítulo 12. COMBUSTIÓN</i> .....                       | 387 |
| 1. Introducción .....                                      | 389 |
| 2. Propiedades y características de los combustibles ..... | 390 |
| 2.1. Humedad .....                                         | 390 |
| 2.2. Materias volátiles y carbono fijo .....               | 391 |
| 2.3. Cenizas .....                                         | 392 |
| 2.4. Límites de inflamabilidad .....                       | 394 |
| 2.5. Temperatura de inflamación y combustión .....         | 395 |
| 2.6. Combustión espontánea .....                           | 396 |
| 2.7. Viscosidad .....                                      | 397 |
| 2.8. Poder calorífico .....                                | 398 |
| 3. Combustión .....                                        | 401 |
| 3.1. Aire mínimo para la combustión .....                  | 402 |
| 3.2. Coeficiente de exceso de aire .....                   | 404 |
| 3.3. Volumen y composición de los humos. Humos secos ..... | 405 |
| 4. El triángulo de la combustión .....                     | 410 |
| 4.1. la recta de la combustión completa .....              | 411 |
| 4.2. El triángulo de la combustión incompleta .....        | 413 |
| 4.3. Utilización del triángulo de la combustión .....      | 418 |
| 5. Ejercicios de autocomprobación .....                    | 419 |
| 6. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....     | 421 |
| <i>Capítulo 13. HOGARES, TIRO Y CHIMENEAS</i> .....        | 425 |
| 1. Introducción .....                                      | 427 |
| 2. Hogar. Temperaturas en el hogar .....                   | 427 |
| 2.1. Temperatura teórica de la combustión .....            | 430 |
| 2.2. Temperatura de régimen del hogar .....                | 431 |

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.3. Temperatura real de llama .....                                                    | 432 |
| 2.4. Cálculo de la temperatura teórica de la combustión .....                           | 433 |
| 3. Rendimiento de la combustión .....                                                   | 436 |
| 4. Clasificación de los hogares .....                                                   | 438 |
| 5. Pérdidas de calor en un hogar .....                                                  | 443 |
| 6. Rendimiento de un hogar .....                                                        | 445 |
| 7. Tiro natural y artificial .....                                                      | 446 |
| 8. Chimeneas .....                                                                      | 451 |
| 9. Cálculo de las dimensiones teóricas de la chimenea .....                             | 455 |
| 10. Ejercicios de autocomprobación .....                                                | 460 |
| 11. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....                                 | 461 |
| <br><i>Capítulo 14. CALDERAS</i> .....                                                  | 465 |
| 1. Introducción .....                                                                   | 467 |
| 2. Calderas y parámetros que definen una caldera .....                                  | 468 |
| 2.1. Calderas pirotubulares .....                                                       | 471 |
| 2.2. Calderas acuotubulares .....                                                       | 474 |
| 2.3. Calderas de fundición .....                                                        | 475 |
| 2.4. Calderas de chapa de acero .....                                                   | 476 |
| 2.5. Accesorios de las calderas .....                                                   | 477 |
| 2.6. Rendimiento de las calderas .....                                                  | 478 |
| 3. Fraccionamiento de potencia .....                                                    | 480 |
| 4. Selección del quemador adecuado a cada caldera .....                                 | 481 |
| 5. Ejercicios de autocomprobación .....                                                 | 482 |
| 6. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....                                  | 483 |
| <br><i>Capítulo 15. TERMODINÁMICA DE LA REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN MECÁNICA</i> ..... | 485 |
| 1. Introducción .....                                                                   | 487 |
| 2. Ciclo inverso de carnot .....                                                        | 489 |
| 3. La máquina frigorífica de compresión mecánica simple de vapor ..                     | 491 |
| 3.1. Régimen inundado .....                                                             | 495 |
| 3.2. Compresión mecánica simple con subenfriamiento del líquido .....                   | 497 |
| 4. Evaporadores, generalidades y clasificación .....                                    | 499 |
| 5. Condensadores .....                                                                  | 509 |
| 5.1. Condensadores enfriados por aire .....                                             | 510 |
| 5.2. Condensadores enfriados por agua .....                                             | 511 |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3. Condensadores evaporativos .....                                | 512 |
| 6. Torres de enfriamiento .....                                      | 513 |
| 6.1. Estanques con surtidores .....                                  | 515 |
| 6.2. Torres atmosféricas .....                                       | 515 |
| 6.3. Torres de tiro forzado mediante ventiladores .....              | 516 |
| 6.4. Torres de evaporación con tiro forzado por eyectores de agua .. | 517 |
| 7. Compresores .....                                                 | 518 |
| 7.1. compresores alternativos .....                                  | 519 |
| 7.2. Compresores rotativos .....                                     | 525 |
| 7.3. Compresores centrífugos .....                                   | 527 |
| 8. Válvulas de laminación .....                                      | 528 |
| 8.1. Tipos de válvulas de laminación .....                           | 530 |
| 9. Ejercicios de autocomprobación .....                              | 538 |
| 10. Solución a los ejercicios de autocomprobación .....              | 540 |
| <i>Bibliografía básica</i> .....                                     | 545 |

La curva así descrita, recibe el nombre de curva de temperatura teórica de la combustión, designándose generalmente por ***temperatura teórica de la combustión***, a la temperatura alcanzada por los humos producto de la combustión al abandonar la cámara.

Esta temperatura, es como se ha dicho característica de cada combustible y más adelante se procederá a su determinación.

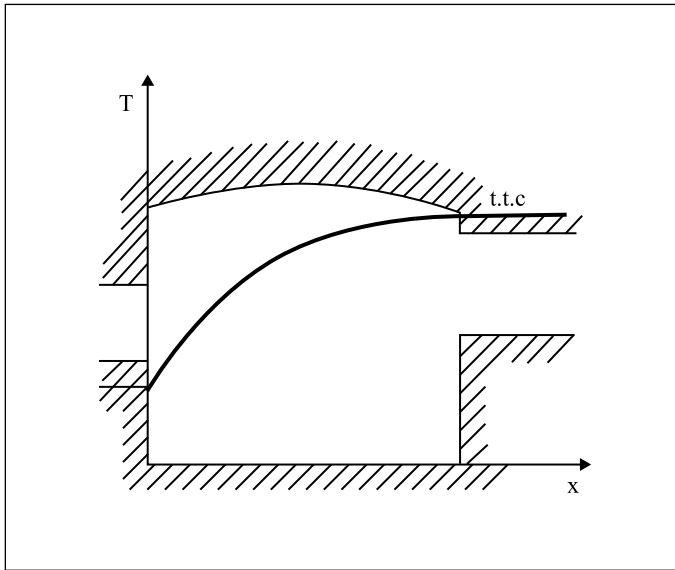


Figura 13.1.

## 2.2. Temperatura de régimen del hogar

Si después de un cierto tiempo de funcionamiento de un hogar, se apagara éste y se midiera, en el instante de apagado, la temperatura en distintos puntos de las paredes que forman la cámara de combustión, se encontraría que la temperatura obtenida sería sensiblemente la misma en todos los puntos del hogar, debido al efecto de conducción de calor a través de las paredes, así como a la radiación térmica entre las mismas.

Representando la temperatura de los distintos puntos de la cámara de combustión, en un sistema de coordenadas temperatura-espacio, se obten-

dría una línea recta, figura 13.2, paralela al eje de abscisas, que recibe el nombre de **temperatura de régimen del hogar**, coincidente con la temperatura real de salida de los humos de la cámara de combustión.

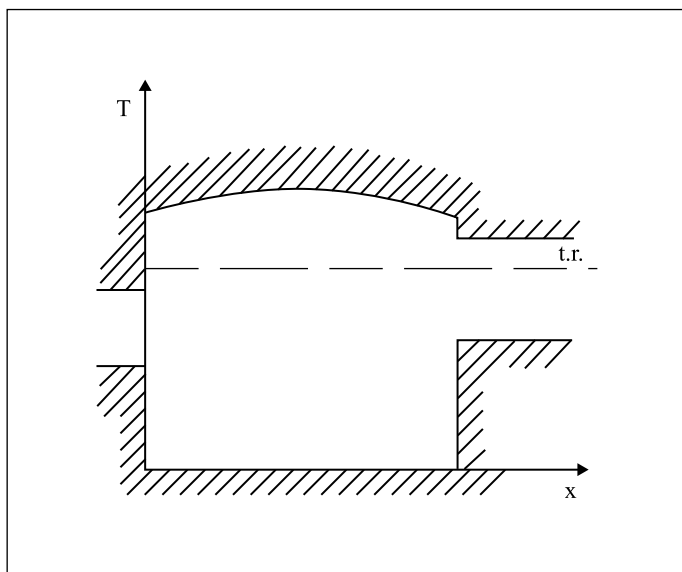


Figura 13.2.

### 2.3. Temperatura real de llama

Si se considera ahora el mismo elemento infinitesimal, que alberga en su interior combustible y comburente, pero desplazándose esta vez en un medio real, el hogar a la temperatura de régimen, y existiendo intercambio de calor, se observaría que en la parte inicial del hogar, al estar éste a mayor temperatura que el elemento, éste recibirá calor por radiación desde las paredes de la cámara de combustión, por lo que su temperatura crecerá más rápidamente que en el caso de la curva teórica. Sin embargo, una vez que el elemento infinitesimal sobrepasa la temperatura de régimen, es el elemento el que cede calor al hogar, con lo que el aumento de temperatura se realizará más lentamente que el caso teórico, llegando a un valor máximo de la temperatura, coincidente con el momento en que el elemento genera en su combustión la misma cantidad de calor que debe radiar a las paredes de la cámara.